第 32 卷 第 3 期　　原 子 核 物 理 评 论　　Vol. 32, No. 3
2023 年 9 月　　Nuclear Physics Review　　Sep. , 2023

文章编号： 1007-4627(2023) 03-0001-09

用于 HIAF-HFRS 装置的飞行时间探测器样机性能研究

吴潇天[1,2]，田 苗[1]，王凯龙[2]，郑 勇[2]，宋雨楠[2,3]，张 磊[1]，章学恒[2]，王 猛[2]

(1. 兰州交通大学数理学院，甘肃兰州 730070;
2. 中国科学院近代物理研究所，甘肃兰州 730000;
3. 中国科学院大学核科学与技术学院，北京 100049)

摘要：本工作制作了一套由快发光塑料闪烁体耦合快光电倍增管组成的塑料闪烁体飞行时间探测器的样机，通过皮秒脉冲激光测试了探测器的时间性能，旨在为将来的 HIAF-HFRS 飞行时间探测器作预研。对于两种不同尺寸的塑闪探测器，通过改变激光的光斑大小、频率、光强和位置等各项参数来模拟真实束流的情况，并使用 CAEN-DT5742 数字化仪以及 Mesytec-MCFD16+MTDC32 电子学系统进行了系统的测试。使用聚焦激光照射在塑闪中心位置时，小尺寸 (7 cm×7 cm) 塑闪探测器的 ToF 分辨最好可达 8 ps；小-大 (26 cm×10 cm) 塑闪探测器的 TOF 分辨最好可达到 12 ps。在改变激光各项参数后，得到的响应时间分辨为 10–16 ps 和 19–46 ps。测试结果表明，所得到的 ToF 分辨满足 HFRS 束线的时间分辨性能要求，为飞行时间探测器的优化奠定了基础。

关键词：塑料闪烁体；飞行时间探测器；ToF 分辨；皮秒脉冲激光；HIAF-HFRS

中图分类号：O571.1　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11804/NuclPhysRev.32.01.01

引言

放射性次级束流线是研究物质微观粒子结构及其之间相互作用的重要装置，是原子核与粒子物理实验等研究前沿领域的重要工具，世界上各大核物理实验室都有建造或计划建造放射性次级束流线[1]。现阶段, 我国的两条放射性次级束流线是兰州重离子研究装置 (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL) 中的第一条放射性次级束流线和第二条放射性次级束流线 (Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou, RIBLL1/RIBLL2)[2-5]。这两条典型的弹核碎裂型次级束流产生装置，可以提供能量在几十 MeV/u 至几百 MeV/u 量级的放射性次级束流，是国际上极少数可以开展从低能到中高能段的次级束物理实验研究的场所之一。随着核物理学的快速发展，提高实验数据的准确性和精度一直是追求的目标，需要不断发展大科学装置和新型实验技术。目前，国际上各大核物理实验室都在建设或者已经建成了新一代的放射性束流线装置，其中就包括我国正在建设的新一代大科学装置强流重离子加速装置 (high-intensity heavy-ion accelerator facility, HIAF) 上的高能次级束分离器 (high-energy fragment separator, HFRS)[6]。

在 HFRS 装置上，可以产生大量远离稳定线的奇特核，清晰地鉴别出每种核素是开展后续各类实验的关键先决条件。通常使用的粒子鉴别方法是所谓的 ΔE-ToF-Bρ 技术，即同时测量束流的能损 (ΔE)、飞行时间 (ToF) 和磁刚度 (Bρ) 来确定离子的质子数 (Z) 与质荷比 (A/Q)[7-8]。根据针对 HFRS 束线的相关模拟，为了保证良好的粒子鉴别，ToF 的分辨需要达到 40 ps[6]；同时，模拟结果显示，次级束的最大流强约为 1 百万/秒。因此，需要使用时间性能优异且能承受高流强的飞行时间探测器来测量 ToF。

塑料闪烁体探测器作为最成熟且使用十分广泛的飞行时间探测器，其时间分辨率高且成本相对较低，已经应用在了国内外各类放射性束流线装置上，比如日本 RIKEN 的 BigRIPS[8]、美国 FRIB 的 ARIS[9] 和欧洲 FAIR 的 SuperFRS[10]，以及国内的 RIBLL1 和 RIBLL2 装置[5,11-12] 都已经应用或计划应用塑闪探测器作为飞行时间探测器。其中，关于 RIBLL1 的 ToF 探测器，在内表面为椭球面的铝制光反射器中的一个焦点安放塑料闪烁体，在椭球面的另一个焦点安放光电倍增管的光阴极，根据椭球面的光学特性，产生的闪烁光会经过相同的反射路径到达 PMT 的光阴极。实验测试得到的时间分辨

收稿日期：2023-09-11；　**修改日期：**2023-09-11
基金项目：国家自然科学基金 (11805243)；国家重点研发计划 (2018YFA0404401)；中国科学院战略性先导科技专项 (XDB34000000)；甘肃省高等学校产业支撑计划项目 (2022CYZC-06)；兰州交通大学-天津大学联合创新基金项目 (2021057)
作者简介：吴潇天 (1996–)，男，安徽合肥人，硕士研究生，从事原子核物理研究；E-mail: 11210552@stu.lzjtu.edu.cn
通信作者：E-mail: tian_miao@163.com
通信作者：E-mail: wangkl@impcas.ac.cn

为 ~140 ps[11]。关于 RIBLL2 的起始时间探测器，使用 10cm×10cm×1mm 的塑料闪烁体，并在其两端分别连接 12 支串行的硅光电倍增管 (SiPM) 来读出信号，束流测试得到的时间分辨为 60 ps[5,12]。参考以上 ToF 探测器的设置，HFRS 装置的 ToF 探测器也应该首先考虑塑闪探测器。

为了研究塑闪探测器的可行性，我们研制了测试样机，旨在通过测试探测器的相关性能，为未来的 HFRS 束线上的飞行时间探测器做预研。本文拟采用激光模拟重离子束流对塑料闪烁体飞行时间探测器的时间性能进行研究。主要通过改变激光的光斑大小、位置、频率以及光强来模拟不同的束流条件，对塑闪探测器进行离线测试，得到相应的时间分辨，为重离子束流实验提供必要的技术参考和支持。

1 测试装置

离线测试的实验设置如图 1 所示。使用 NKT 光技术集团公司生产的 PiL1-037-40 皮秒脉冲激光器[13] 作为粒子源，其具体性能参数如表 1 所示。我们一共组装了三个塑料闪烁体探测器，均由一片薄的塑料闪烁体和围绕在四周的四个光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 组成, 然后通过支架将探测器支撑起来。根据对 HFRS 束线的初步 LISE++[14] 模拟得到的次级束的束斑大小，考虑到 HFRS 束线存在两种工作模式，当处于消色差模式时, 小尺寸的塑料闪烁体能够满足束流要求；然而在色散模式下，束流轰击次级靶使得靶后束流束斑变大，则束线末端需要使用大尺寸的塑料闪烁体。因此我们确定了塑料闪烁体的尺寸为：两个小塑闪的尺寸为 70 × 70 × 0.5 mm^3, 大塑闪的尺寸为 260×100×1 mm^3。小的和大的塑闪分别是由美国 Eljen Technology 公司生产的 EJ-228 和 EJ-230[15]，其具体性能参数如表 2 所示。PMT 是由日本滨松公司生产的内置 R4998-PMT 的 H6533 套件[16]，其具体性能参数如表 3 所示。我们所选的塑闪和 PMT 都具有非常优异的时间性能，以期得到最好的时间分辨。

表 1 测试用 PiL1-037-40 激光器的性能参数[13]

特性	参数
波长	375 nm
脉冲最大重复频率	40 MHz
脉冲宽度	100 ps
峰值功率	3 W

激光器产生短激光脉冲，依次轰击三个平行放置的间距 10 cm 的塑料闪烁探测器。在紧贴着激光器的后面, 可以放置一个 ×10 的扩束镜, 从而将直径 ~2 mm 的激光光斑扩大为直径 >20 mm 的光斑，从而更真实的模拟次级束流的束斑尺寸。另外, 激光器以及三个塑闪探测器都可以通过其支撑平台或者导轨支架实现上下左右前后的滑动，用以测试探测器在激光轰击在不同位置时的时间响应。整个探测器系统都被放置于暗箱中, 以满足避光要求。在实验电子学方面，我们首先运用意大利 CAEN 公司制造的 DT5742 数字化仪[17] 对塑闪探测器的信号特性进行采样分析，然后再使用德国 Mesytec 公司制造的 MCFD-16 定时甄别器和 MTDC-32 时间-数字转换器[18] 对塑闪探测器进行更进一步的时间性能测试。DT5742 数字化仪的最高采样率可达 5 GS/s，能够胜任快时间探测器的采样分析。MCFD-16 定时甄别器的最大带宽可达 600 MHz，可以定时上升时间在 2 ns 左右的信号；后面接入的 MTDC-32 的道址分辨最高可达 4 ps/ch，可以分析较高时间分辨的信号。

表 2 EJ-228 和 EJ-230 塑料闪烁体的性能参数[15]

特性	EJ-228	EJ-230
光输出 (% 相对于蒽)	67	64
效率 (光子/1 MeV e$^-$)	10200	9700
最大强度发射光波长 (nm)	391	
上升时间 (ns)	0.5	
衰减时间 (ns)	1.4	1.5
发光信号宽度 (ns)	1.2	1.3
密度 (g/cm^3)	1.023	
折射率	1.58	

表 3 内置 R4998-PMT 的 H6533 套件的性能参数[16]

特性	参数
套件尺寸	⌀31 mm
PMT 直径	⌀25 mm
工作电压	-2250V
接收光波长范围	300–650nm
接收光峰值波长	420 nm
光敏感度	70 μA/lm
量子效率	13%–39%
电子倍增系数	5.7×10^6
上升时间	0.7 ns
渡越时间	10 ns
渡越时间分散	0.16 ns

2 数据分析与结果

由于我们使用激光作为粒子源模拟束流，首先需要标定激光轰击塑闪探测器产生的信号与真实带电粒子产生的信号幅度的比例，我们采用 ^{241}Am/^{244}Cm α 源进行刻度。将 α 源放置于 1 号小塑闪前方约 2.5 cm 处，通过示波器显示其中一个 PMT 输出的信号，随后保持 PMT 的电压不变，分别使用未扩束和扩束的激光对塑闪进行照射，同样使用示波器记录信号，这三种情况下的信号

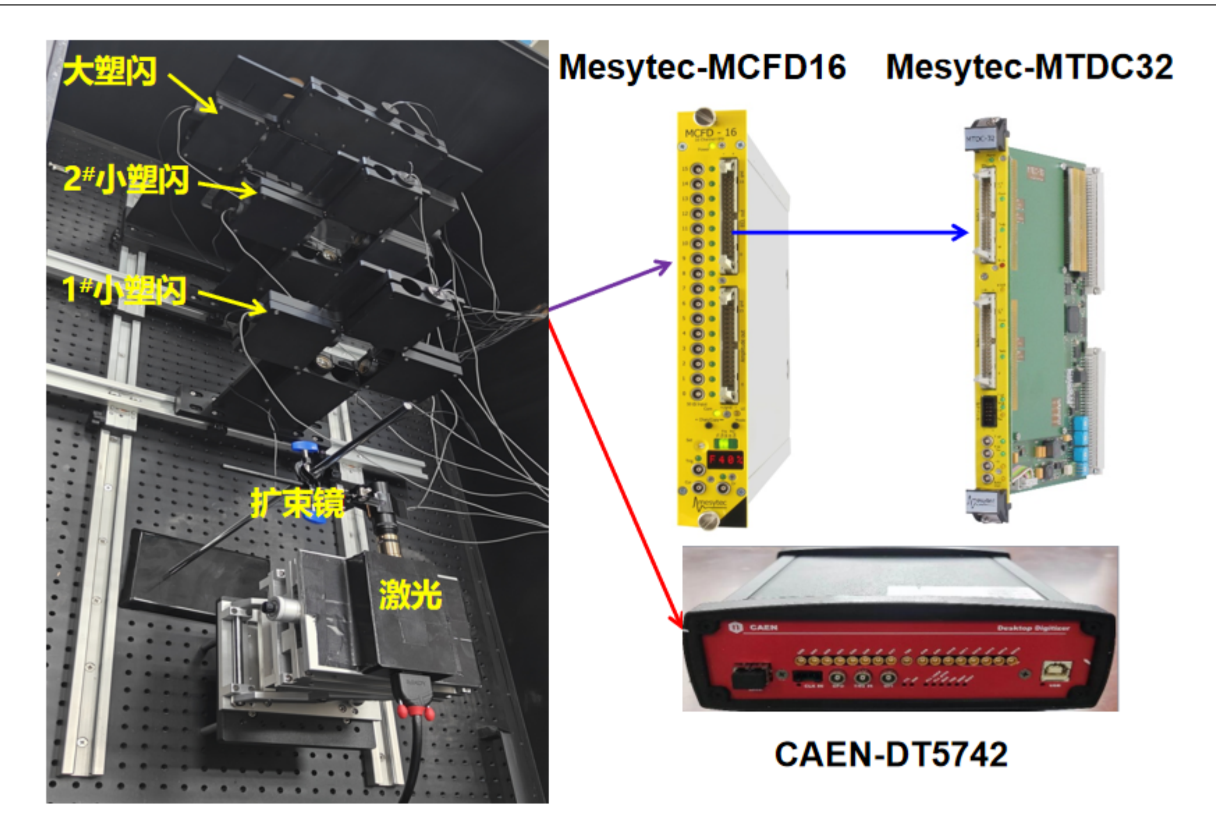


图 1　(在线彩图) 测试装置示意图

幅度比较如图 2 所示。由图可知，未扩束的激光在塑闪探测器上产生的信号幅度是 α 源的 400 倍以上，扩束后的约为 150 倍。我们所使用的放射源辐射出的 α 粒子最大能量为 5.8 MeV，穿过 2.5 cm 的空气产生一定能损，辐射到塑闪时能量剩余约 3.4 MeV，则在相同的条件下，未扩束的激光照射在塑闪上等同于 1400 MeV 能量的粒子，扩束后的激光等同于 540 MeV 能量的粒子。初步模拟显示，HFRS 产生的次级束能量约在 500 AMeV，在相同探测器设置下，预计其在塑闪上产生的信号幅度将会在 10 V 左右。由于大的信号幅度通常会带来更好的时间分辨，将来重离子束流测试得到的时间分辨将不会差于本文使用的激光测试得到的结果。

如前文所述，首先使用 DT5742 数字化仪提取探测器信号的相关特性，然后着重采用 MCFD16+MTDC32 电子学系统来测试探测器在不同情况下的时间分辨。

2.1　信号特性

幅度和上升时间是信号最基本的两种特性，它们分别反映了探测器的能量分辨和时间分辨。得益于 DT5742 数字化仪 12 bit 的垂直分辨和 5 GS/s 的采样率，塑闪探测器的信号波形被完整地记录下来。依据文献[19] 中介绍的确定基线和寻峰算法，通过分析波形提取了信号的幅度和上升时间（10%–90%）。图 3 展示了不同激光光斑大小下，一个 PMT 输出信号的幅度和上升时间的分布。可以看到，在对同样的激光束流添加扩束镜以后，信号的幅度有所减小，其展宽也增大了一倍。这是比较容易理解的，由于同样的激光脉冲在扩束以后，其分散在塑料闪烁体上更大的范围内，从而使得 PMT 测到的闪烁光的强度更加分散，峰值强度也会有所减弱。而对于信号的上升时间，其主要取决于轰击束流的种类，因此同样的激光束流产生的信号上升时间并无明显改变，在两种情况下都为 1.5 ns 左右。这里需要说明的是，我们使用的 DT5742 数字化仪的输入量程只有 1 V，因此需要调节 PMT 的高压，使其信号的最大幅度不超过 1 V。

2.2　时间分辨

塑闪探测器的飞行时间分辨是其最核心的性能。本文搭建的塑闪探测器的四边各配置了一个 PMT，因此，探测器的响应时间点由四个 PMT 的响应时刻的平均值得到。通过这样的平均化处理，不仅可以减小束流轰击在塑闪片不同位置时产生的光程差所引起的定时晃动，而且多个 PMT 能够接收更多的闪烁光子，从而提高时间分辨率。在本实验中，我们将前面的 1 号小塑闪作为 ToF 的起始时间，将后面的 2 号小塑闪和大塑闪分别作为终止时间。由此得到的 ToF 计算公式为：

$$ToF = \frac{t_{b_1}+t_{b_2}+t_{b_3}+t_{b_4}}{4} - \frac{t_{a_1}+t_{a_2}+t_{a_3}+t_{a_4}}{4}, \quad (1)$$

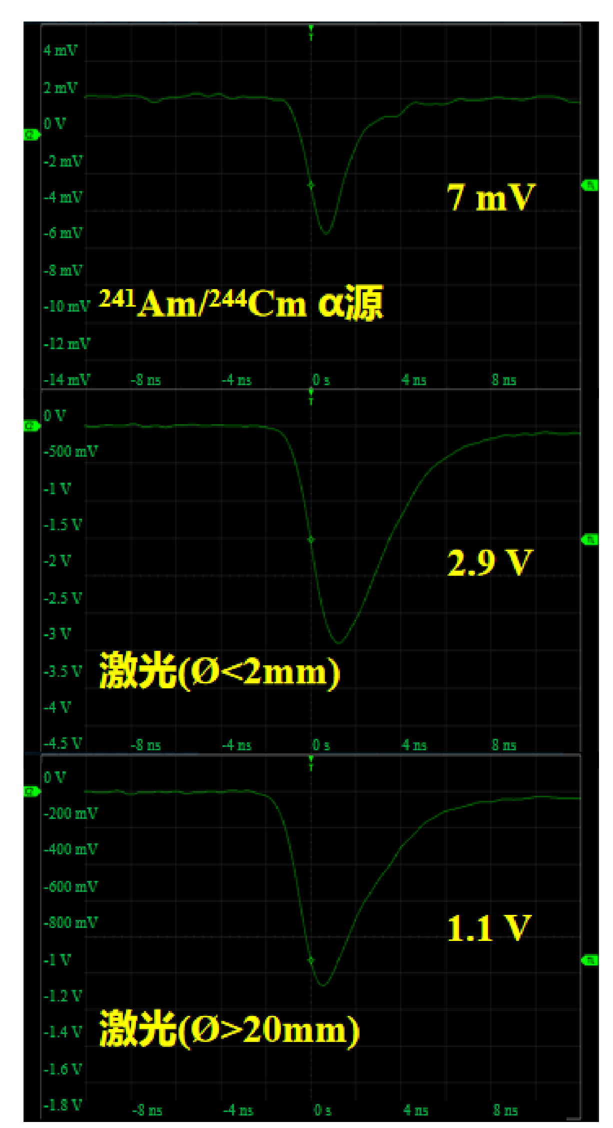


图 2　(在线彩图) 使用 α 源以及两种光斑大小的激光分别轰击在塑闪上，示波器测到的其中一个 PMT 输出的信号

式中，t_{a_i} 和 t_{b_i} 分别表示前面和后面的塑闪探测器的编号为 i 的 PMT 的响应时刻。

首先，在将 PMT 信号幅度调整至 1 V 以内的条件下，我们依然使用 DT5742 数字化仪，利用模拟传统恒比定时器的算法提取了信号的定时点。由此得到的 ToF 分布如图 4 所示，在不同光斑大小下，ToF 分布呈现出两个不同的高斯峰，每个峰的 σ 值代表一种光斑大小下的 ToF 分辨（下文涉及 ToF 分布的直方图其 ToF 分辨均为 σ 值）。两个小塑闪测到的 ToF 分辨都在 11 ps 左右，而小塑闪-大塑闪测到的 ToF 分辨由聚焦束情况下的 11 ps 变差为扩束之后的 22 ps。可以看到，尽管经过了上述的平均化处理，激光束斑扩大以后带来的光程差晃动对于面积更大的塑闪的定时影响仍较大。为了减弱这种影响，我们可以采用一些方法，比如提高 PMT 的工作电压、增加 PMT 的数量等。在这里，我们尝试提高 PMT 的高压，使得其信号幅度超过 1 V，并利用 MCFD16+MTDC32 进行了相应的测试。图 5 展示了测试得到的 ToF 分布。可以看到，随着信号幅度的增大，时间分辨率也得到了提高。其中在大光斑的情况下，两个小塑闪测得的 ToF 分辨达到了 ~9 ps，小-大塑闪测得的 ToF 分辨也提高至 19 ps。

对于吸收的塑性时间分辨性能，我们分别使用两套获取系统对不同尺寸闪光的时间分辨进行测试。第一种用途是数字化仪 DT5742，数字化仪与 PMT 直接信号使用线路连接，记录一个信号的完整波形，每个波形包含 1024 个采样点。通过模拟恒比定时识别模块的工作原理对数字化仪进行控制波形信号进行处理，将记录所得波形数据每个 PMT 的信号到达时间，再通过上式进行计算结果塑性闪光的时间分辨。

综上所述，小塑闪的时间分辨总是优于大塑闪；扩束后的时间分辨普遍较扩束前差；提高 PMT 的工作电压可以改善时间分辨。

2.3　不同激光条件下的时间分辨性能

在束流实验中，通过主束打靶产生的次级束包含很多不同的粒子，其强度和能量也各有差异；此外，束流在传输过程中受到调束及其它探测器的影响，最终到达并轰击塑闪时，束流所击中的地方可能并不在其中心。为了更真实的还原束流实验条件，我们在后续测试中始终采用扩束光斑，并对激光进行了三种调整，包括改变激光频率、光强和位置。由于 DT5742 数字化仪的量程限制以及其记录波形导致的无法工作于高计数率条件下，因此我们选择 MCFD16+MTDC32 电子学系统进行数据获取，并且将 PMT 的高压维持在产生较大信号的水平上。

2.3.1　改变激光频率

首先，我们的测试所改变的激光条件是脉冲重复频率，其所代表的就是束流实验中的流强。依据 HFRS 装置建设前准备工作的模拟结果显示，HFRS 上次级束的最大流强约为 1 百万/秒。由此我们选择了 800 Hz、10 kHz、100 kHz 和 1 MHz 这四种激光频率进行了测试，以研究不同频率对塑闪的时间分辨的影响。

测试结果如图 6 所示。可以看出，在激光频率小于等于 100 kHz 时，ToF 分辨相差无几：两个小塑闪的时间分辨为 11 ps 左右，小-大塑闪的时间分辨为 19 ps 左右。在激光频率设置为 1 MHz 时，ToF 分辨相对较差，两种探测器组合的时间分辨分别为 15 ps 和 22 ps 左右，但是仍然满足 HFRS 需要的 40 ps 的要求。造成这个结果的可能原因是因为所使用的 MCFD16+MTDC32 电子学系统本身性能以及 USB2.0 信号线数据传输速度的限制，导致在高计数率情况下存在数据丢失的问题，实际测得

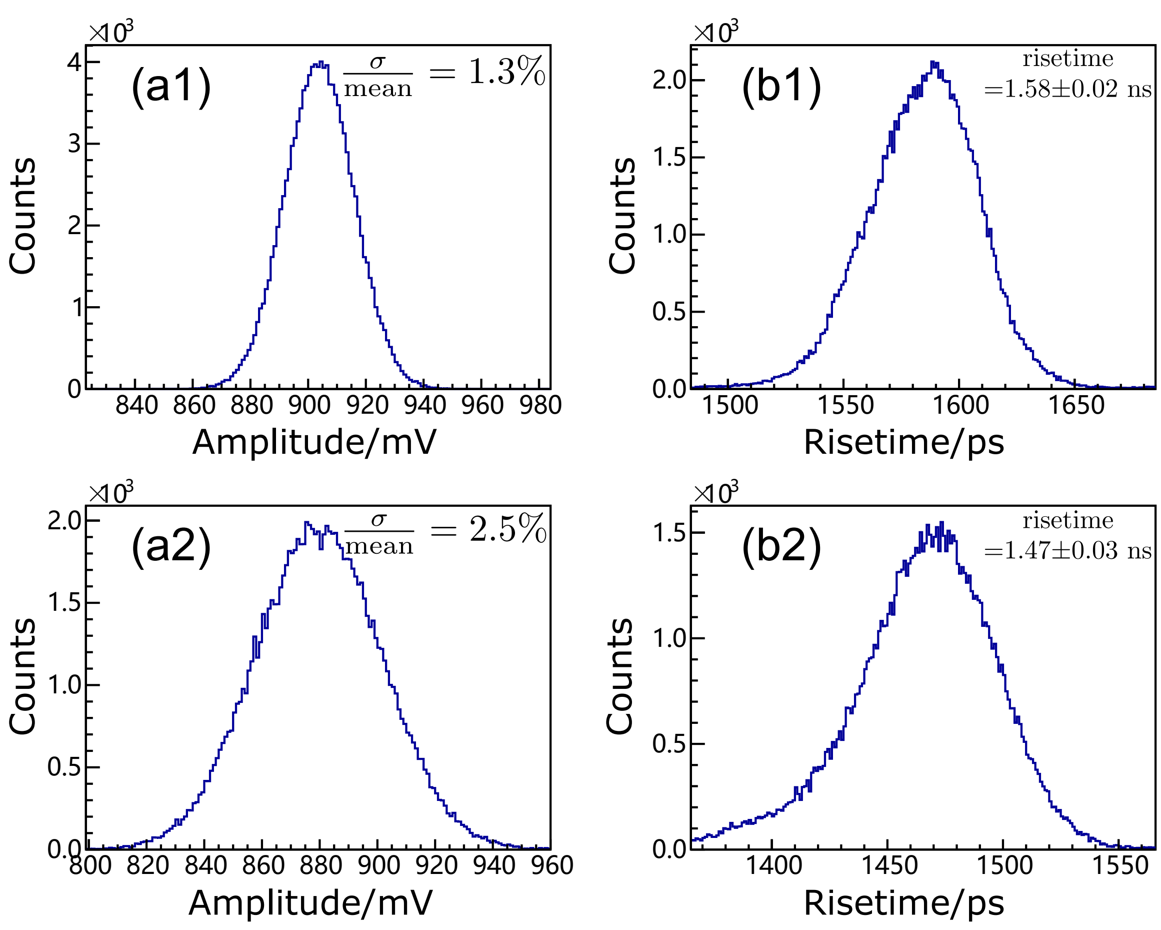


图 3　（a1）未扩束的和（a2）扩束后的激光照射在塑闪上，其中一个 PMT 输出信号的幅度；（b1）未扩束的和（b2）扩束后的激光照射在塑闪上，其中一个 PMT 输出信号的上升时间。

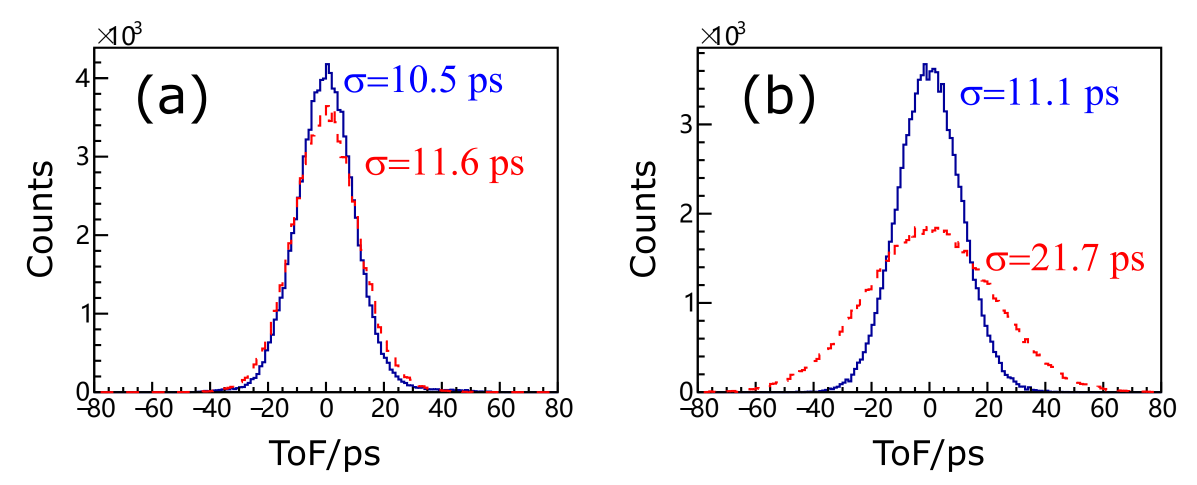


图 4　（在线彩图）使用 DT5742 数字化仪得到的 ToF 放置：（a）和（b）分别为两个小塑闪和小-大塑闪的 ToF，蓝色实线和红色虚线分别代表未这里，为了比较时间分辨，我们将 ToF 分布的中心位置都平移到 0 处，并且将所有分布的分布都方便归一化到 10 万（下面涉及 ToF 分布的直方）图都做了如此处理）。

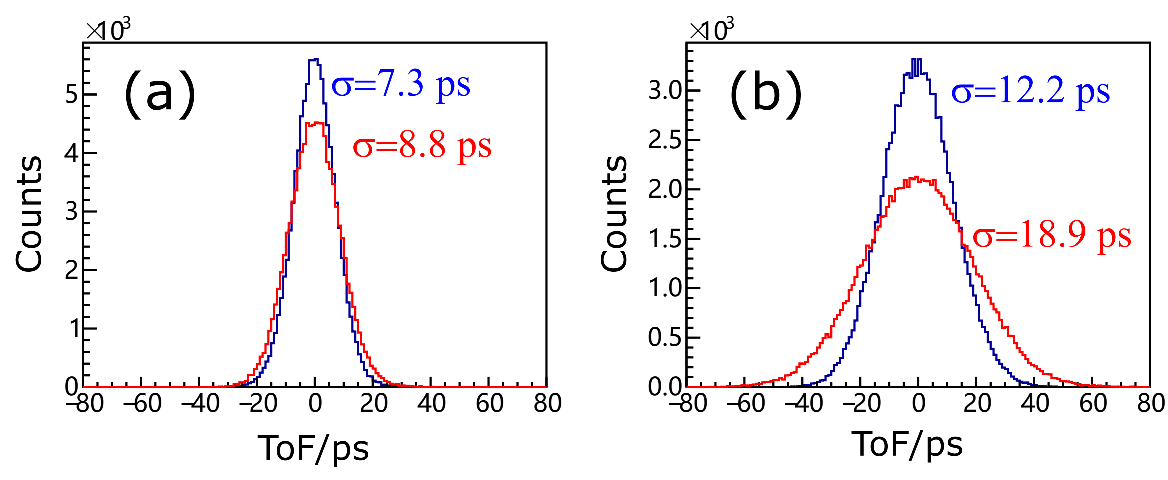


图 5 （在线彩图）使用 MCFD16+ MTDC 32 电子学系统得到的 ToF 分辨：（a）和（b）分别为两个小塑闪和小-大塑闪的 ToF，蓝色实线和红色虚线分别代表未扩束和扩束的情况。

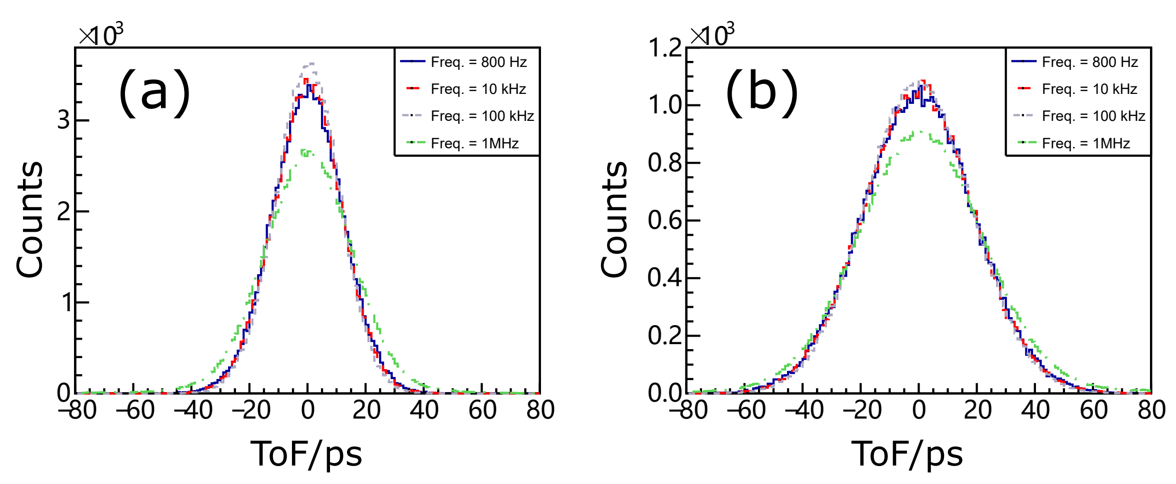


图 6 (在线彩图) 四种不同激光重复频率情况下 (蓝色实线-800 Hz、红色虚线-10 kHz、灰色点线-100 kHz、绿色点划线-1 MHz), (a) 两个小塑闪和（b）小-大塑闪的 ToF 分辨。

的计数率仅为 180 kcps。因此，将来需要发展适用于高技术率下的电子学获取系统。

2.3.2 改变激光光强

在真实束流实验时，不同的次级束具有不同的能量，我们在测试中通过改变激光器的光强衰减系数来模拟这一效应。在一次测试中，衰减系数从 10% 逐步改变至 40%，从而得到不同的激光光强。由于超过 40% 的衰减会导致 PMT 所收集到的闪烁光微弱到无法输出正常信号，因此我们在测试过程中将最高衰减值限制在 40%。

测试结果如图 7 所示，两个小塑闪的 ToF 分辨依旧为 12 ps，小-大塑闪的 ToF 分辨也为 19 ps，两种尺寸的塑闪的 ToF 分辨与相同光强下的实验结果相差无几。这也说明，MCFD16 的恒比定时功能表现非常优异。因此，激光光强的变化对塑闪的时间分辨并没有影响，由此得到在真实束流实验中不同能量的粒子，对塑闪的 ToF 分辨的影响也较小。

2.3.3 改变激光位置

最后，测试所改变的激光条件是激光位置，得到激光照射在塑闪不同位置的 ToF 分辨。其目的在于模拟真实实验中束流轰击到塑闪不同位置时造成的时间分辨的变化。我们通过移动激光器和 1 号小塑闪使激光照射在大塑闪上九个不同的位置，覆盖的区域大概在水平 ±4 cm、垂直 ±2 cm 的范围，并保持激光一直照射在小塑闪的中心位置。通过大塑闪左右两端 PMT 信号的时间差可以标定水平方向的相对位置分布，而上下两端的 PMT 信号的时间差可以标定垂直方向的相对位置分布。

图 8 展示了光斑在大塑闪上的相对位置分布，我们可以清晰地观察到九个独立的团簇，这对应于激光的九个轰击位置。我们在移动激光器的过程中，尽量保持水平移动或者垂直移动使得照射的九个位置为 3 × 3 的网格点，未能在位置分布图中准确再现该网格点的原因可能是由于人工移动器件存在误差。根据图中团簇斑点旁

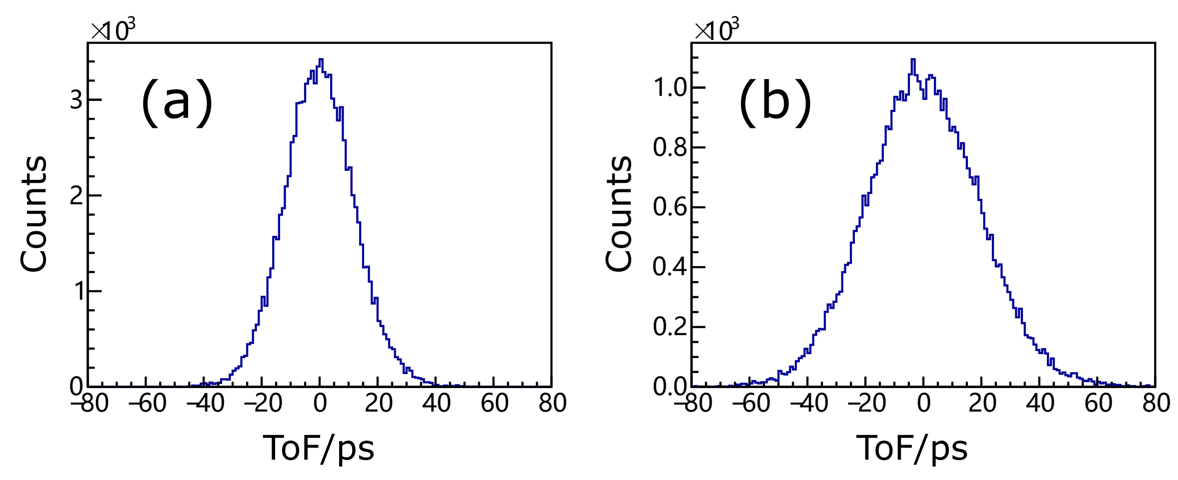


图 7　在不断改变激光光强的条件下，测得的（a）两个小塑闪和（b）小-大塑闪的 ToF 分辨。

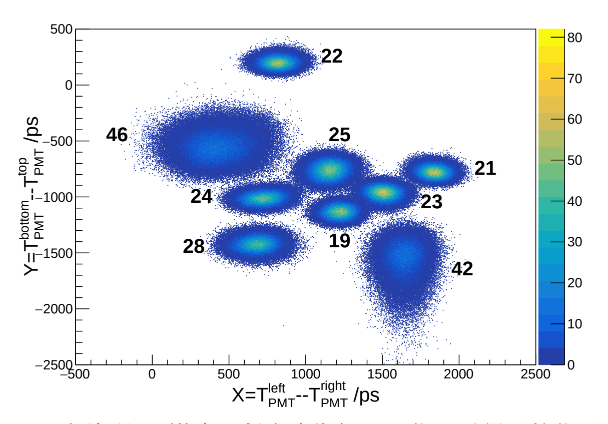


图 8　(在线彩图) 激光照射在大塑闪不同位置时得到的位置分布以及各处的 ToF 分辨

的标注，我们可以看到激光照射在不同位置处时，小-大塑闪的 ToF 分辨在 19–46 ps 范围。值得注意的是，位于中间位置的 ToF 分辨最佳，可以达到 19 ps，而靠近最边缘位置的 ToF 分辨相对较差，达到 42–46 ps。造成后者时间分辨较差的原因在于，当激光照射在边缘位置时，闪烁光射入 PMT 的角度会有很大地倾斜，由此带来的光程差的晃动也会更大；另一方面，远端的 PMT 探测到的光子数量较少，导致其输出信号非常微弱，进而带来较大的定时误差。可以期望，在大塑闪四周耦合更多的 PMT 时，边缘位置效应对 ToF 分辨的影响会得到极大的改善。

3　总结与展望

本研究利用脉冲激光对由快发光塑料闪烁体和四周耦合的快光电倍增管组成的飞行时间探测器的时间性能进行了研究，为将来的 HIAF-HFRS 大科学装置上的飞行时间探测器作了预研。针对两种不同尺寸的薄塑料闪烁体，通过调整激光参数，包括激光光斑大小、频率、光强和位置等各种条件，模拟真实的束流情况，并对其飞行时间分辨率进行了详细的测试和分析。

根据 DT5742 数字化仪以及 MCFD16+MTDC32 电子学系统所获取的数据分析显示，小尺寸塑闪的 ToF 分辨显然优于大尺寸塑闪，在激光束斑 ⌀<2 mm 的情况下，小尺寸塑闪的 ToF 分辨可达到 8 ps，小-大塑闪的 ToF 分辨也可达到 13 ps 以内。在使用扩束镜将光斑扩大为 ⌀>20 mm 的情况下，测试了激光在不同重复频率、光强和照射位置时塑闪探测器的时间分辨：小尺寸塑闪的 ToF 分辨在 10–16 ps，小-大塑闪的 ToF 分辨为 19–46 ps。测试得到的时间分辨在束流中心区域满足 HFRS 束流线对于飞行时间分辨的要求。

在测试中，我们发现边缘位置效应对塑闪时间分辨具有较大的影响。为了进一步提高时间分辨率，我们计划在未来的测试中增加更多的光电倍增管耦合于塑闪的周围。另外，我们发现在流强达到 1 MHz 的时候，电子学获取系统存在较大的数据丢失问题，针对这一问题，我们目前正在与核电子学专业人员进行合作，致力于开发一种具有更高计数率的获取系统用于我们的装置。最终，我们计划是在对探测器及其获取系统进行更新和升级后，在 RIBLL2 上开展重离子束流实验来测试其时间性能。

参考文献

[1] BLUMENFELD Y, NILSSON T, Van Duppen P. Phys Scr, 2013, T152: 014023. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/2013/T152/014023.

[2] XIA J, ZHAN W, WEI B, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 2002, 488(1-2): 11. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900202004758. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)00475-8.

[3] SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 2003, 503(3): 496. https://www.sciencedirect.com/science/ar

ticle/pii/S0168900203010052. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01005-2.

[4] SUN B H, ZHAO J W, ZHANG X H, et al. Sci Bull, 2018, 63(2): 78. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095927317306242. DOI: 10.1016/j.scib.2017.12.005.

[5] FANG F, TANG S, WANG S, et al. Nucl Phys Rev, 2022, 39(1): 65. http://www.npr.ac.cn/en/article/doi/10.11804/NuclPhysRev.39.2021035. DOI: 10.11804/NUCLPHYSREV.39.2021035.

[6] ZHOU X, YANG J. AAPPS Bull, 2022, 32(1): 35. https://link.springer.com/article/10.1007/s43673-022-00064-1.

[7] TARASOV O B, PORTILLO M, AMTHOR A M, et al. Phys Rev C, 2009, 80(3): 034609. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.80.034609.

[8] FUKUDA N, KUBO T, OHNISHI T, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 2013, 317: 323. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X13009890https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X13009890. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.08.048.

[9] PORTILLO M, SHERRILL B, CHOI Y, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 2023, 540: 151. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X23001556. DOI: 10.1016/j.nimb.2023.04.025.

[10] VESIĆ J, SAHA S, GÓRSKA M, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 2023, 1047: 167714. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900222010063. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167714.

[11] LI J, ZHAN W, GUO Z, et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1999, 23(3): 6. (in Chinese)
(李加兴, 詹文龙, 郭忠言, 等. 高能物理与核物理, 1999, 23(3): 6. http://hepnp.ihep.ac.cn/article/id/df9085b6-1ddb-40b1-a135-f7730d1f2549.)

[12] ZHOU B, ZHANG X, FANG F, et al. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3): 8. (in Chinese)
(周冰倩, 章学恒, 方芳, 等. 原子核物理评论, 2020, 37(3): 8. http://www.npr.ac.cn/cn/article/doi/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53.)

[13] PILAS - NKT Photonics[EB/OL]. [2023-07-20]. https://www.nktphotonics.com/products/pulsed-diode-lasers/pilas/.

[14] TARASOV O, BAZIN D. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 2008, 266(19-20): 4657. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X08007969. DOI: 10.1016/j.nimb.2008.05.110.

[15] EJ-228, EJ230 - Fast Timing Plastic Scintillator - Eljen Technology [EB/OL]. [2023-07-14]. https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-228-ej-230.

[16] Photomultiplier tube assembly H6533 | Hamamatsu Photonics [EB/OL]. [2023-07-14]. https://www.hamamatsu.com/us/en/product/type/H6533/index.html.

[17] DT5742 - 16+1 Channel 12 bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer - CAEN - Tools for Discovery[EB/OL]. [2023-07-14]. https://www.caen.it/products/dt5742/.

[18] mesytec - Nuclear Physics[EB/OL]. [2023-07-14]. https://www.mesytec.com/products/nuclear-physics.html.

[19] WANG K, SAMARANAYAKE S, ESTRADE A. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 2022, 1027: 166050. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900221009815. DOI: 10.1016/j.nima.2021.166050.

Study on the Performance of a Prototype of Time-of-flight Detectors for HIAF-HFRS Facility

WU Xiaotian[1, 2], TIAN Miao[1], WANG Kailong[2], ZHENG Yong[2], SONG Yunan[2, 3], ZHANG Lei[1], ZHANG Xueheng[2], WANG Meng[2]

(*1. School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;*
2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;
3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this work, we presented the test results for a prototype of plastic scintillation detectors for time-of-flight measurement, aiming to provide preliminary research for the future development of time-of-flight detectors for HIAF-HFRS facility. Each timing detectors was composed of a fast scintillating plastic and four fast photomultiplier tubes coupled to its four sides. The time performance of the detectors was tested using pico-second pulsed laser, For two plastic scintillation detectors with different sizes, a pico-second pulsed laser was used to simulating the actual ion-beam situation by changing laser's parameters including spot size, repetition rate, light intensity and hitting position. The data was processed utilizing CAEN-DT5742 digitizer and Mesytec-MCFD16+MTDC32 electronics. When the focused laser hit at the center of the plastic scintillators, the time-of-flight (ToF) resolution of two small-sized (7 cm×7 cm) plastic scintillation detectors could reach 8 ps, whereas the ToF resolution of the small and large (26 cm×10 cm) detectors could achieve 12 ps. After varying the parameters of the laser, the corresponding ToF resolutions were found to be in the range of 10–16 ps and 19–46 ps, respectively. The ToF resolutions from the test meets the timing-resolution requirement of the HFRS beamline, thereby establishing a solid foundation for further optimizing the time-of-flight detectors.

Key words: plastic scintillator; time-of-flight detector; ToF resolution; pico-second pulsed laser; HIAF-HFRS

Received date: 11 Sep. 2023; **Revised date:** 11 Sep. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11805243); National Key R&D Program of China (2018YFA0404401); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB34000000); Industrial Support and Guidance Project of Universities in Gansu Province, China (2022CYZC-06); Lanzhou Jiaotong University-Tianjin University Joint Innovation Fund Project (2021057)

Corresponding author: TIAN Miao, E-mail: tian_miao@163.com

Corresponding author: WANG Kailong, E-mail: wangkl@impcas.ac.cn